

安培浚, 张志强, 王立伟. 地球关键带的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1 228-1 234, doi:10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2016. 12. 1228. [An Peijun, Zhang Zhiqiang, Wang Liwei. Review of Earth critical zone research[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(12): 1 228-1 234, doi:10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2016. 12. 1228.]

地球关键带的研究进展^{*}

安培浚¹, 张志强², 王立伟¹

(1. 中国科学院兰州文献情报中心, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院成都文献情报中心, 四川 成都 610041)

摘 要:地球关键带(Earth Critical Zone)由美国国家研究理事会于2001年正式提出以来,倍受关注,取得了重要研究进展。总结分析了美国、德国、澳大利亚、法国和中国等国家,以及欧盟等相关国际组织相继开展和部署的地球关键带研究项目及相关研究计划、主要科学问题、未来发展方向等,并结合我国研究现状,提出我国应加强地球关键带结构、形成与演化机制,地球关键带物质迁移转化与多过程耦合作用机制,地球关键带服务功能、演化特点及其对可持续发展的支撑和影响,地球关键带过程及系统的模型模拟4个方面研究,通过积极与国际科技发达国家开展合作和交流,提高国际大型计划的参与度。

关 键 词:地球关键带;地球系统科学;地球化学循环;物质迁移;能量流动

中图分类号:P49

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2016)12-1228-07

1 引 言

自2001年美国国家研究理事会2001年在出版的《地球科学基础研究的机遇》一书中首次正式提出地球关键带(Earth Critical Zone)的概念以来^[1],美国国家科学基金会先后在2005年发布的《地球关键带探索的前沿》报告和2009年的《解决气候难题:研究全球的气候变化影响》报告中,对地球关键带包括的区域进行了不同表述^[2,3]。美国特拉华大学的地球关键带研究中心认为地球关键带是以界面为特征的,例如,空气—水界面是气体和矿物质交换的地方,根系—土壤界面是微生物促进营养物质交换的地方^[4]。宾夕法尼亚州立大学 Susan Brantley 提出,地球关键带是地质、地球化学、生物、水文、地貌和大气过程组成的复杂、相互依赖、网络的“焦

点”区域。^[5] Lin 等^[6,7]先后对地球关键带界面层包括的范围和地球关键带的一般特征进行了分析总结,地球关键带的空间界限范围:上到植被冠层,下到地下水蓄水层底部,它包含着近地表的生物圈、大气圈、整个土壤圈,以及水圈和岩石圈地表/近地表的部分(图1)。

尽管地球关键带研究在科学界一直存在争议:

(1)许多人认为地球关键带类似于土壤,而实际上地球关键带比土壤更加宽泛^[6,8,9]。

(2)一些人将“地球关键带”作为普通的地学术语“风化层”的同义词(风化层被定义为:破碎的且不固定的岩石物质,无论残留的或运输的,几乎在土地及其上部、基岩表层存在。它包括所有种类的岩石碎片——火山灰、冰川漂流物、冲积物、黄土、植物残骸堆积物、土壤)^[7,10]。

^{*} 收稿日期:2016-10-16;修回日期:2016-11-21.

^{*} 基金项目:中国科学院青年创新促进会(编号:Y4AC011001);国家自然科学基金项目“西北典型旱作农业农户对于旱灾害风险的影响研究”(编号:41401649)资助.

作者简介:安培浚(1979-),女,山西应县人,副研究员,主要从事地球科学战略情报研究/信息分析. E-mail: anpj@llas. ac. cn

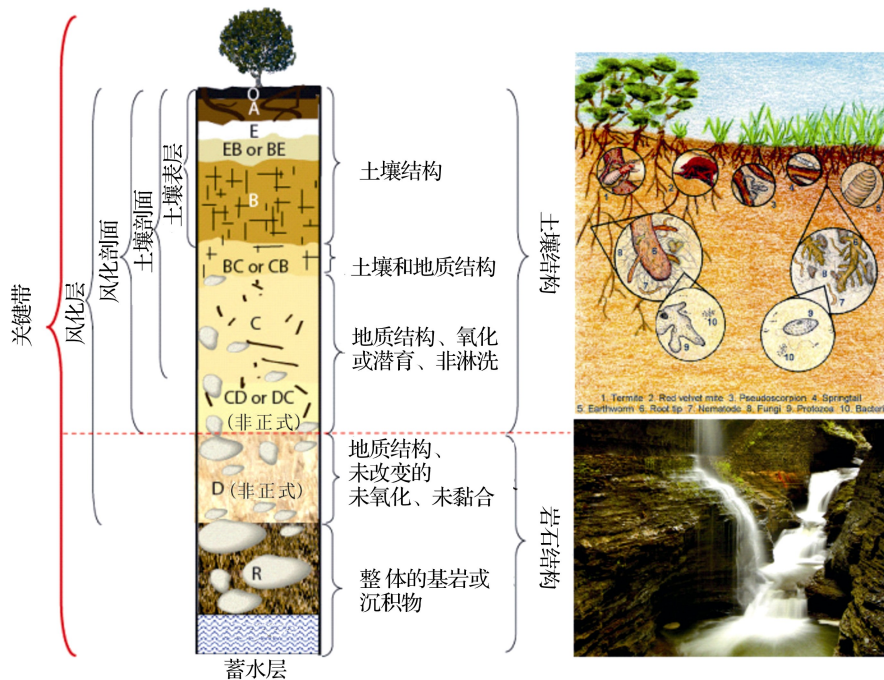


图 1 地球关键带、风化层、风化剖面、土壤剖面、土壤表层的概念^[7]

Fig. 1 Framework about Earth Critical Zone, weathered layer, weathered section, soil profile and surface soil layer^[7]

(3) 一些人已经质疑地球关键带概念的实用性,因为其范围的下界不明确,并且在不同空间地理区域的关键带厚度相差甚远^[1]。

(4) 许多研究者认为,地球关键带的概念比较有用,因为它是内在的,以过程为导向,并且它是作为一个统一框架来调节水文循环、地球化学循环、碳循环、氮循环、气体交换(主要气体与示踪气体)、侵蚀与沉积、风化作用(化学风化与物理风化)、岩化(成岩作用)、土壤形成与演变(成土作用)、生命过程(巨生物与微生物群体,包括植物和动物)以及人类影响(土地利用与管理)^[1,7,11,12]。然而,从学科体系化的角度来看,无论是其研究的科学内涵还是与之相关的外延,地球关键带系统研究都只是“概念”性的表述,而不是学科体系化的“科学”。但地球关键带研究发展迅速,并取得了重要进展。

2 国际地球关键带研究项目与计划

地球关键带研究受到了主要科技大国的关注和重视,相继开展和部署了相关研究项目与计划^[2,4,13,14]。2005 年,美国特拉华大学主持召开了由美国科学基金会资助的研讨会“地球关键带研究的前沿”,在此次研讨会上,科学家呼吁发展地球关键带研究计划,并进一步明确了相关的内涵。地球关键带研究包括地球关键带界面控制的碳通量、微粒

物质,控制土壤和水资源长期可持续性及其重要的生物地球化学过程和机制,以及地球关键带界面上营养生态系统在地质和人类时间尺度上的变化过程等。为了减轻人类对复杂生态环境的影响并最终维持食物的生产,有必要理解和预测地球关键带对全球和区域变化的响应。研讨会后,开始实施了一系列具体的研究行动。

美国科学基金会 2005 年启动项目群“地球关键带观测计划”,研究发生在岩石、土壤、水、空气以及生物之间复杂的相互作用。2006 年 7 月,美国科学基金会通过招标建立了最初的 3 个地球关键带观测站。2006 年 10 月,美国特拉华大学宣布成立一个地球关键带研究中心,从而进行有关地球关键带的环境,及维持地球生命的研究。2009 年 10 月,美国科学基金会又新建了 3 个观测站点,2014 年 1 月,公布了新的地球关键带研究计划,资助新建了 4 个地球关键带观测站,开展地表过程研究。

欧盟委员会同期也资助开展了 SoilTrEC 项目,主要开发一个支持食品和纤维生产,水、营养和污染物过滤、缓冲和转换,碳、生物栖息地、基因库存储和量化土壤过程的综合模型,建立一个土壤侵蚀、溶质运输、养分和碳的转换和食物链于一体的流域尺度计算过程模型;建立一个利用原型模拟器评估土壤威胁和缓减方法的地理信息系统数字平台;基于物

理模型支持新的决策系统的生命周期研究方法和生态经济学方法;通过数据集验证集成模型的土壤过程描述生命周期内土壤形成、生产、使用和退化的关键阶段;结合欧盟、美国和中国观测网络,研究岩性、气候和土地利用变化,土壤渗透率变化。

法国国家科研署、法国国家科学研究中心、法国研究与发展研究所、法国农业科学研究院、法国环境与农业与科技研究院,以及一些大学,联合建立法国河流流域网络,监测地球表面的永久环境,研究地表水以及化学物质循环,根据土地覆盖以及土壤的状态获得研究结果,了解地球关键带关于从短期气候变化强迫改变到长期气候变化的响应,鼓励地球关键带的跨学科研究,培育和推广综合的科学方法以及常用的测量,在一元数据的模式上建立共享模式。

德国也建立了地球关键带观测网络平台,可以和亥姆霍兹研究中心的其他设备一起全面调查全球变化对陆地生态系统和社会经济的影响,提供长期的统计分析和系统变量,并通过集成模型系统,分析预测全球变化引发的结果。观测系统需要一个跨学科的方法来完成反馈系统不同环节复杂的相互关系,主要科学目标包括:气候变化对陆地(包括地下水、土壤、植被、表层水)预期影响后果是什么?地表系统的交换过程反馈(如地表和大气之间的反馈)对水和其他物质地面通量的影响机制是什么?土壤和土地利用方式的改变对水平衡、土壤肥力、生物多样性和区域气候的影响是什么?采矿、森林砍伐等大范围的人为干扰会对陆地系统产生何种影响?

澳大利亚创新、工业、科学和研究部、昆士兰政府和澳大利亚政府教育投资基金联合资助建设澳大利亚生态系统研究网络,收集并整合跨空间尺度和时间尺度的生态系统数据,实现数据的安全存储、访问、共享和管理,建立协作机制解决未来生态系统科学中的问题,解决当下和未来澳大利亚生态科学和环境管理的关键问题。

目前,我国的地球关键带研究越来越得到科学界的重视^[15]。2010 年 7 月举办的“水文土壤学与地球关键带前沿研究及应用国际学术研讨会”,引进并推动地球关键带科学在国内的发展。2014 年 5 月,国家自然科学基金委员会与中国科学院地学部联合召开双清论坛“地表圈层相互作用带科学前沿探索”和科学与技术前沿论坛“地球关键带科学”,围绕地球关键带形成、组成与演化,地球关键带功能及其演变和可持续性,地球关键带过程与物质循环和全球关键带网络建设与中国的地球关键带科学研

究 4 个主题,探讨地球关键带相关领域的重大科学前沿和国家需求,以及相关基础研究可能的重大突破点与未来的重大基础性科学问题。2015 年 4 月,国家自然科学基金委员会与英国自然环境研究理事会共同征集和资助“地球关键带中水和土壤的生态服务功能维持机理研究”中英重大国际合作研究计划。2015 年 10 月,由中国和美国国家科学基金会联合召开“中美地球关键带科学研讨会”,讨论了当今地球关键带研究的内涵,国际合作中面临的机遇与挑战,地球关键带观测的基本要素、方法和手段,及中美双方地球关键带未来合作研究计划等。

3 地球关键带研究的主要科学问题

当前的土地利用和气候变化使得陆地表面快速地发生着变化,需要加大科学观测力度和规模,这对于了解、预测和管理环境变化的影响是必不可少的。这些证据对未来具有重要的意义,如获取干净的水和足够的食物,防止洪水、饥荒和干旱的威胁。地球关键带目前正面临着诸如人口增长、资源短缺等方面的巨大压力,在未来的 40 年里,人们对食物和化石燃料的需求将会加倍,对水资源的需求将会增长 50%,因此,对地球关键带地质过程以及速率的理解、预测、管理等将对人类和经济的可持续性发展、缓和、适应气候变化等至关重要(图 2)。

本文对 2005—2015 年地球关键带研究中相关会议涉及的研究主题和科学问题进行了总结^[1,2,4,16,17]。研究主题主要包括:风化和侵蚀过程对环境因素与生物过程的互馈作用机理、生物在地球关键带中的作用、地球关键带演化的时间尺度及在不同时间尺度上的影响、气候变化对地球关键带生物地球化学过程的影响方式和速率、地球关键带结构的演化与预测等。强调解决的主要问题有:什么控制地球关键带属性和过程?地球关键带的生物地球化学过程如何对土壤和水资源的可持续性产生影响?地球关键带的结构、物质的存储和流通如何响应气候变化与土地利用?如何利用地球关键带的研究成果来增强生态系统的弹性和可持续性和抗干扰能力?

美国科学基金会地球关键带 2011 年度工作报告,确定了地球关键带研究的 6 个关键科学问题^[18,19]。地球关键带过程控制着土壤的发育、水的质量和流动、化学循环,进而调节能源和矿物资源的形成与发展,这一切对地表上的生命而言,都非常重要。但是,人类对地球关键带却知之甚少,需要深入

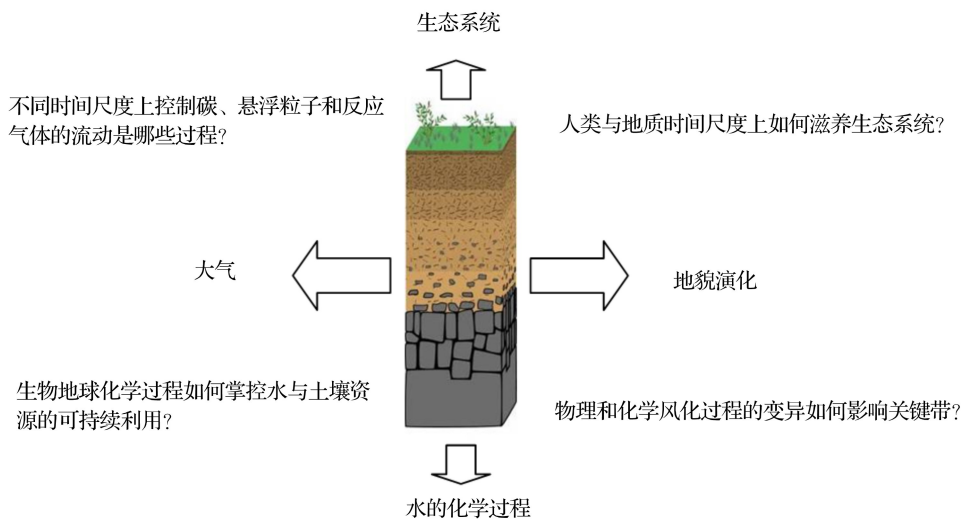


图 2 地球关键带重要研究问题的 4 个层面 (来源: http://www.czen.org/files/czen/CZEN_Booklet.pdf)

Fig. 2 Four aspects of key research problems about Earth Critical Zone: Air, water, ecosystem and land

系统开展相关研究。

科学问题一: 风化层 (由覆盖于坚硬岩石的松散不均匀的物质组成的地球关键带部分) 的地质演化是怎样构建地球关键带内生态系统功能的可持续性?

研究面临的挑战: ①基岩生态系统对环境变化的响应; ②预测地球关键带结构和基岩属性; ③地球关键带研究的方法 (如物探); ④风化层形成和转化之间的关系; ⑤绘制风化层化学物质结构和矿物裂缝方向/密度图。

科学问题二: 土壤和下垫岩石中分子的相互作用, 以及如何影响流域开发和地下蓄水层?

研究面临的挑战: ①自然的相互作用, 如植物/土壤、土壤/岩石, 土壤/大气和渗流/潜水区交互界面; ②在实验室中重现地球关键带分子相互作用的能力; ③基因和生物出现新响应和分子尺度相互作用的可能性; ④地球关键带时空异质性的原因, 如生物地球化学/相关物理基底异质性或潜在原因; ⑤短暂的高强度活动与低强度持续的过程率 (频率、强度) 的影响; ⑥通过定义状态参数来描述地球关键带流域尺度的能力; ⑦研究观测地点和监测方法选择的主要标准。

科学问题三: 如何从单分子到全球尺度上将理论和数据相结合, 解释过去的地球表面变化和预测地球关键带演化及其行星碰撞?

研究面临的挑战: ①地球关键带在碳、沉积物、能量和水通量上与全球变化的响应; ②预测研究地

点扰动变化; ③地球关键带在全新世到更新世 (冰川期到冰河期) 转变的响应; ④如何通过一维地球关键带模型链接生物、物理和化学过程, 解释地球关键带结构的遗留物及其建造的景观历史。

科学问题四: 怎样通过数学建模对地球关键带进行定量观测和预测?

研究面临的挑战: ①缺乏阈值信息, 不确定地球关键带系统研究能走多远; ②对地球关键带系统相关性研究的不确定性; ③未知的敏感性变量, 如河岸地带、永久冻土和土壤肥力。

科学问题五: 如何通过遥感和监测技术、电子/网络基础设施和建模集成方法, 模拟陆地环境变量和预测水供应、食品生产、生物多样性?

研究面临的挑战: 国际地球关键带观测管理机构必须提升所需要的融合水平, 包括对地球关键带观测内部会员的要求; 融合地球关键带观测数据和模型共享。

科学问题六: 怎样将自然和社会科学的理论、数据和数学模型相集成, 综合模拟和管理地球关键带的商品和服务?

研究面临的挑战: ①缺乏学科的整合和标准 (过程或学科整合); ②人类对自然景观适应的长期影响; ③人类反馈响应迟缓; ④缺少有关过渡时期接近临界值的研究; ⑤不能通过使用目前测量和预测的变量来实现服务预测 (例如对食品或生物量做预测是可以实现的, 但对于固碳来说则是不可能的); ⑥对地球关键带系统的结构分类的不确定性。

4 地球关键带研究未来发展方向

地球关键带的结构和功能不断演化,并不断响应着地球历史中的气候和构造扰动,尤其要应对近期由人类活动加速驱动的变化。地球关键带观测站将有潜力促使地球表层研究发生科学变革,未来地球关键带研究主要发展方向和任务,可以概括为以下4个方面^[20,21]。

(1) 开发一个统一的地球关键带演化理论框架

地质时期的景观变化,是驱动地壳的构造过程与气候驱动的地貌和地球化学过程之间相互作用的结果。从短期来看,坡地与水—岩石相互作用有关的河流系统的物质流动是地球关键带演化的重要步骤,其中水—岩石相互作用有助于向水文通量中释放溶质。虽然这些过程与水文循环有关,但是它们进一步受到土壤和植被共同进化的调节,还不能将这些个别过程架构成一个关于景观进化的整体的、可预测的概念模型^[22]。这一局限的原因主要是,对水文过程、地球化学过程、地貌过程和生物进程的耦合关系,及其包括的正反面反馈,以及它们在时间和空间上的分布,尚缺乏完整的相关知识。

(2) 开发耦合的系统模型来探究地球关键带服务

景观和生态系统对于气候变化和土地利用压力相关干扰的响应,取决于一个与水、能源和风化周期相关复杂系列的耦合过程。对临界生态响应的更好预测,需要对物理和化学景观有一个更清晰的认识,这些景观能缓冲气候驱动力、塑造环境,环境中的生物也会做出响应。类似地,生态系统结构的变化将影响地球关键带结构的形成,并影响地球关键带的服务提供能力。生态系统功能与水、能源与风化循环之间的耦合将在地球关键带观测站得到测量,并为耦合的系统模型的发展奠定基础,这样有利于在地球关键带开展生物和物理过程之间相互作用和反馈的研究^[23]。将在地球关键带观测站内部或者跨观测站之间的水文、气象和生物地球化学测量整合为一个耦合的系统模型,对提供多尺度和多进程的认识是至关重要的。当前虽然缺乏这种认识,但是这对推进地球关键带的预测是有必要的。

(3) 开发一个集成的数据和测量框架并进行验证

未来地球关键带研究,与过程模型和假设检验有关,将需要异常丰富的数据集,数据集时间上连续、空间上分布密集、过程上综合^[24]。多样的数据

类型(比如沉积物运输、地下水、基岩风化)将揭示跨越好几个数量级的特征。收集这些数据集需要对现场环境传感器、野外设备、遥感、地表和地下成像给予大力经费支持,包括新技术的开发。如果我們能在地球关键带内部和之间解决能量、水和物质流的通量,将为生态系统和景观进化与适应提供基本的观点。显然,定量认识和提高模拟景观能量和水循环的能力,将依赖于新测量方法和仪器设备,这些设备能够捕捉大气输入中的空间和时间变异等信息,并把这些大气输入叠加在复杂的植被类型、异质性的覆盖、各向异性的地下地质媒介上。

(4) 建立多学科集成的地球关键带观测站

地球关键带观测站的战略是将单独研究的地表科学(生态学、水文学、土壤学、地球化学、地貌学),在观测和模拟过程中进行有机整合,从而能更好地理解过程的耦合,过程耦合引起了长期的景观进化和对短期环境变化的响应^[25,26]。流域间学科的交叉融合是地球关键带观测站框架的一个明显特征,这些流域具有跨越地质和地形的站点联系。在过去的1~3年,地球关键带观测站一直在不断建立完整的多学科科学团队,从而解决这些问题。地球关键带观测站已经开始投入基础设施建设以便进行密集的数据收集工作,以满足这些科学团队及其开发概念模型和数学模型的需求。

5 关于我国地球关键带研究的建议

地球关键带是异质的近地表环境,并以界面为特征,是一个动态、复杂的区域,生物系统从这个区域的界面上吸取养分和部分能量,同时也能对这一区域产生深刻的影响,特别是人类活动的作用尤为显著。研究这一动态区域中发生的过程需要多个学科科学家的参与,并需要多种研究方法的集成。建立临界带观测站与观测网络,为科学家提供一个以系统方式致力于研究近地表过程的基地,有利于增进对地球关键带的认识。国际上地球关键带研究在地表过程研究前沿的基础上更新,研究的领域更深、更广,研究的内容更综合、更交叉,研究的任务更着重理论创新、更加面向社会需求,研究的技术与方法更先进,研究的趋势更定量化、更动态、定位、更突出长期监测,而且研究范围日趋全球化、国际化。地球关键带研究将推动生物地球化学、生态水文学和水文土壤学等新兴交叉学科及地球物理等高新技术研究方法体系的发展。

认识多学科交叉是宏观研究领域未来发展的特

点,也是目前农业、生态和环境研究的需求。地球关键带研究作为一个综合交叉学科,研究不同时间和空间尺度上土壤、水文、植被和大气相互作用过程及其景观、物质能量传输的关系,能够在学科、时空尺度和资料间进行有效的联结,有助于深入理解和解决目前环境、生态、农业、地质和自然资源方面存在的重要问题,包括流域水管理、水质、土壤质量、空气质量、景观过程、流域管理、养分循环、精准农业、废物处理、气候变化和生态功能等。地球关键带的提出和发展能够为解决全球界面问题和中国的地表过程与资源生态研究提供新的思路。

我国具有结构、形成演化和气候及土地利用变化影响多样性的地球关键带,建立我国的关键带观测研究网络进行关键带科学的研究将对全球关键科学研究做出重要贡献。我国目前还主要以单要素近地表过程综合研究为主,地表要素间系统性的有机关联不够。为了促进我国地球关键带科学研究的发展,未来应着重围绕上述核心科学问题,重点开展以下4个方向的研究:

(1) 地球关键带结构、形成与演化机制

多时空尺度地球关键带形成和演化的特征、机制及其对地质、气候、水文条件和生物活动的响应;地球关键带物质循环的控制机制及其对生态功能的制约;全球变化及社会经济发展对我国主要地球关键带结构组成及演化的影响机理与预测。

(2) 地球关键带物质迁移转化与多过程耦合作用机制

主要开展物质组分和元素在地球关键带垂直界面迁移转化的物理、化学和生物过程及耦合机制;地球关键带过程在各圈层内及不同圈层间的耦合及其耦合作用驱动物质形态转化与迁移的规律;我国主要地球关键带和流域碳(氮、磷等)循环、水循环过程及耦合机理;定量表述地球关键带过程与流域物质循环的动力学进程和多过程的联动机制,并实现对未来发展趋势的准确预测。

(3) 地球关键带的服务功能、特点演化及其对可持续发展的支撑和影响

气候变化与土地利用变化对我国主要地球关键带生物多样性、水资源的作用机理;污染物在地球关键带不同圈层间的迁移转化及净化机制;地球关键带不同生态系统服务功能的评估、预测和管理保护机制。

(4) 地球关键带过程及系统的模型模拟研究

地球关键带能量和物质通量、迁移和转化的耦

合模型研究;分析处于岩石、水、土壤、生物、大气各圈层交接面上的地球关键带各种物理、生物、化学过程以及它们之间的相互作用;通过数据同化技术使地球关键带系统模型实现向流域及全球尺度的扩展;基于监测和模拟的地球关键带重要特征参数的空间制图。

参考文献(References):

- [1] National Research Council (NRC). Basic Research Opportunities in Earth Science[M]. Washington DC: National Academy Press, 2001.
- [2] NSF. Frontiers in Exploration of the Critical Zone [R/OL]. 2005. http://www.czen.org/files/czen/CZEN_Booklet.pdf.
- [3] NSF. Solving the Puzzle: Researching the Impacts of Climate Change around the World[R/OL]. 2009 [2013-02-28]. <https://www.nsf.gov/news/nsf09202/index.jsp>.
- [4] University of Delaware. New Critical Zone Observatory Seeks to Answer Climate Change Questions [EB/OL]. 2009 [2010-04-28]. <http://www.udel.edu/udaily/2010/sep/observatory092809.html>.
- [5] Brantley S, White T S, White A F, et al. Frontiers in Exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF) [R]. USA, 2005.
- [6] Lin H S, Bouma J, Wilding L, et al. Advances in hydropedology [J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 1-89, doi: 10.1016/S0065-2113(04)85001-6.
- [7] Lin H. Earth's critical zone and hydropedology: Concepts, characteristics and advances [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14: 25-45, doi: 10.5194/hess-14-25-2010.
- [8] Commission of the European Communities. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for the Protection of Soil[R]. COM-232, Brussels, 2006.
- [9] Bouma J. Soils are back on the global agenda: Now what? [J]. *Geoderma*, 2009, 150: 224-225.
- [10] Bates R L, Jackson J A. Glossary of Geology (3rd) [R]. American Geological Institute, Alexandria, Virginia, USA, 1987: 425.
- [11] National Research Council (NRC). Opportunities in the Hydrologic Sciences[M]. Washington DC, USA: National Academy Press, 1991.
- [12] Anderson S P, Bales R C, Duffy C J. Critical Zone Observatories: Building a network to advance interdisciplinary study of Earth surface processes [J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72 (1): 7-10.
- [13] NSF. Critical Zone Observatory Program [EB/OL]. 2011. [2012-06-30]. https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp? pims_id=500044.
- [14] NSF. NSF Awards Grants for Four New Critical Zone Observatories to study Earth Surface Processes [EB/OL]. [2014-01-26]. http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp? cntn_id=130115&WT.mc_id=USNSF_51&WT.mc_ev=click.
- [15] Fu B J, Li S G, Yu X B, et al. Chinese ecosystem re-search net-

- work: Progress and perspective [J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 225-233.
- [16] Banwart S A, Bernasconi S, Bloem J, *et al.* Assessing soil processes and function across an international network of critical zone observatories: Research hypotheses and experimental design [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10: 974-987.
- [17] Grant G, Firestone M, Derry L. Critical Zone Observatory Steering Committee Report[R]. San Juan, Puerto Rico: Critical Zone Observatory Annual Meeting, 2012.
- [18] NSF. Report of the International Critical Zone Observatory Workshop [R]. U. Delaware (USA): Sustaining Earth ' s Critical Zone, 2011.
- [19] Banwart S, Chorover J, Spark D, *et al.* Report of the International Critical Zone Observatory Workshop [R]. U. Delaware (USA): Sustaining Earth ' s Critical Zone, 2011.
- [20] Guo Li, Henry Lin. Critical zone research and observatories: Current status and future perspectives [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, doi:10.2136/vzj2016.06.0050.
- [21] Anderson R S, Anderson S, Aufdenkampe A K, *et al.* Future Directions for Critical Zone Observatory (CZO) Science [R/OL]. [2010-12-29]. https://criticalzone.org/images/national/associated-files/1National/CZO-FutureDirectionsReport_v3.pdf.
- [22] NSF. Design of Global Environmental Gradient Experiments using International Networks of Critical Zone Observatories [R/OL]. 2016 [2012-03-24]. <http://www.nsf.gov/geo/ear/programs/czo/czo-intl-workshop-report-2011.pdf>.
- [23] Clark W C, Crutzen P J, Schellnhuber H J. Science for global sustainability: Toward a new paradigm [M] // Schellnhuber H J, Crutzen P J, Clark W C, *et al.*, eds. *Earth System Analysis for Sustainability*. Berlin: Dahlem University Press, 2004: 1-28.
- [24] Banwart S A. Assessing soil processes and function across an international network of Critical Zone Observatories: Research hypotheses and experimental design [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 974-987.
- [25] White T, Brantley S, Banwart S, *et al.* The role of critical zone observatories in critical zone science [J]. *Developments in Earth Surface Processes*, 2015, (19): 15-78.
- [26] Chorover J, Anderson S, Aufdenkampe A K, *et al.* Common Critical Zone Observatory Infrastructure and Measurement [R/OL]. 2016 [2015-05-05]. https://criticalzone.org/images/national/associated-files/1National/CZO_Common_Measurements_5-5-15.pdf.

Review of Earth Critical Zone Research^{*}

An Peijun¹, Zhang Zhiqiang², Wang Liwei¹

(1. Lanzhou Library and Information Centre of the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Chengdu Library and Information Center of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Since the Earth Critical Zone put forward by National Research Council of America in 2001, it has got a lot of attention and some significant progresses have been made. This paper summarized those Earth Critical Zone projects and related research plans organized and implemented by the United States of America, Germany, Australia, France, China and the European Union, as well as main scientific problems and future development direction in the study of Earth Critical Zone. According to research status of China, the four main research contents should be strengthened including structure, formation and evolution mechanism of Earth Critical Zone, the coupling interaction mechanism between migration and transformation of material and multi-processes, service function and evolution features of Earth Critical Zone and its support and effect on sustainable development, model simulation of process and system of Earth Critical Zone. In addition, our country should actively conduct cooperation and communication with the advanced countries, and enhance our involvement in international key research plans.

Key words: Earth Critical Zone; Earth system science; Geochemical cycle; Material migration; Energy flow.

^{*} **Foundation item:** Project supported by the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (No. Y4AC011001); the National Natural Science Foundation of China "Farmland households' response to drought disaster risk in typical dry-farming agriculture area of north-west China" (No. 41401649).

First author: An Peijun (1979-), female, Yingxian County, Shanxi Province, Associate professor. Research areas include geoscience strategy information research and analysis. **E-mail:** anpj@llas.ac.cn